

УДК 531.383

DOI: 10.22213/2410-9304-2021-1-41-53

Разработка информационно-сетевого комплекса для сопровождения производственных операций контроля, диагностики и настройки точностных характеристик твердотельных волновых гироскопов

Р. И. Мингазов, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Р. В. Мельников, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Ф. И. Спиридонов, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

К. В. Шишаков, доктор технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Статья посвящена разработке информационно-сетевого комплекса (ИСК) для сопровождения производственных операций контроля, диагностики и настройки точностных характеристик твердотельных волновых гироскопов с целью повышения качества изделий и эффективности технологических процессов.

Для этого сначала проведен анализ существующих информационных систем сопровождения автоматизации технологических процессов и их контроля. Обсуждается возможность использования таких систем в производстве твердотельных волновых гироскопов.

В результате предложена структура ИСК, разделяющаяся на физическую и информационную подсистемы. В ней физическая подсистема представляет собой набор коммутирующих устройств в виде стенов с промышленными компьютерами, узлов связи, серверов и персональных компьютеров и других периферийных устройств. А информационная подсистема включает программное обеспечение для автоматизации технологических операций и анализа получаемых данных. Предполагается, что программное обеспечение анализа данных будет также производить запросы к базе данных и обрабатывать большие объемы информации с использованием алгоритмов машинного обучения.

Для повышения эффективности всей системы организуется автоматический сбор физических и точностных параметров изделий на разных этапах их производства. Среди основных планируемых результатов работы ИСК выделены: оптимизация технологических процессов и выявление сложных многофакторных нелинейных зависимостей параметров качества от параметров технологических операций, а также автоматическое оперативное выявление неисправного оборудования с выработкой рекомендаций по его ремонту и автоматический оперативный контроль уровня квалификации операторов с регулировщиками.

Отдельно обсуждаются способы интегрирования ИСК в производственный процесс изготовления твердотельного волнового гироскопа.

Ключевые слова: твердотельный волновой гироскоп, машинное обучение, программное обеспечение, автоматизация производства, технологические процессы.

Введение

Разработка и изготовление твердотельных волновых гироскопов (ТВГ) является наукоемким процессом, включающим в себя большое количество различных технологических процессов [1–4], требующих оптимизации и автоматизации. На сегодняшний день при изготовлении ТВГ большинство операций проводится и контролируется человеком, причем большое количество информации заносится и хранится на бумажных носителях. Присутствует высокий уровень временных затрат на поиск нужной информации в бумажных журналах, а также при перенесении информации с бумажных носителей в электронные таблицы. Отсутствует единый формат данных на разных производственных участках, не контролируется интерпретация данных в технологических операциях. Выявление факторов качества и рентабельности выпуска-

емой продукции при таком подходе является трудоемкой задачей, увеличивающей временные сроки.

В современных условиях для повышения эффективности производства начинают широко внедрять удаленный диспетчерский контроль, включая выполнение мониторинга и контроля различных параметров оборудования и технологических процессов посредством вычислительных машин и сетей [5–7]. При этом внедряемая система выполняет опрос данных о состоянии станков с ЧПУ, измерительных стенов и другого оборудования. Параллельно добавляется сбор данных непосредственно с изготавливаемой продукции, измеряются промежуточные параметры на каждой операции.

Целью работы является рассмотрение основных вопросов построения информационно-сетевого комплекса (ИСК) для повышения эф-

фективности совершенствования и производства твердотельных волновых гироскопов (ТВГ), а также навигационных приборов на их основе. При этом приоритет отдается информационному сопровождению производственных операций контроля, диагностики и настройки точностных характеристик гироскопов.

Постановка задачи по построению ИСК

При изготовлении ТВГ определяющим фактором повышения эффективности производства является измерение и контроль нормативов физических и точностных параметров изделий на

каждом технологическом этапе [8–13]. На рис. 1 приведены основные контролируемые и настраиваемые характеристики, влияющие на точность изготавливаемых гироскопов. Они разнесены по соответствующим укрупненным этапам производства ТВГ. По такому же принципу структурируется программное обеспечение для интеллектуального сопровождения соответствующих технологических операций в рамках полного цикла изготовления продукции.

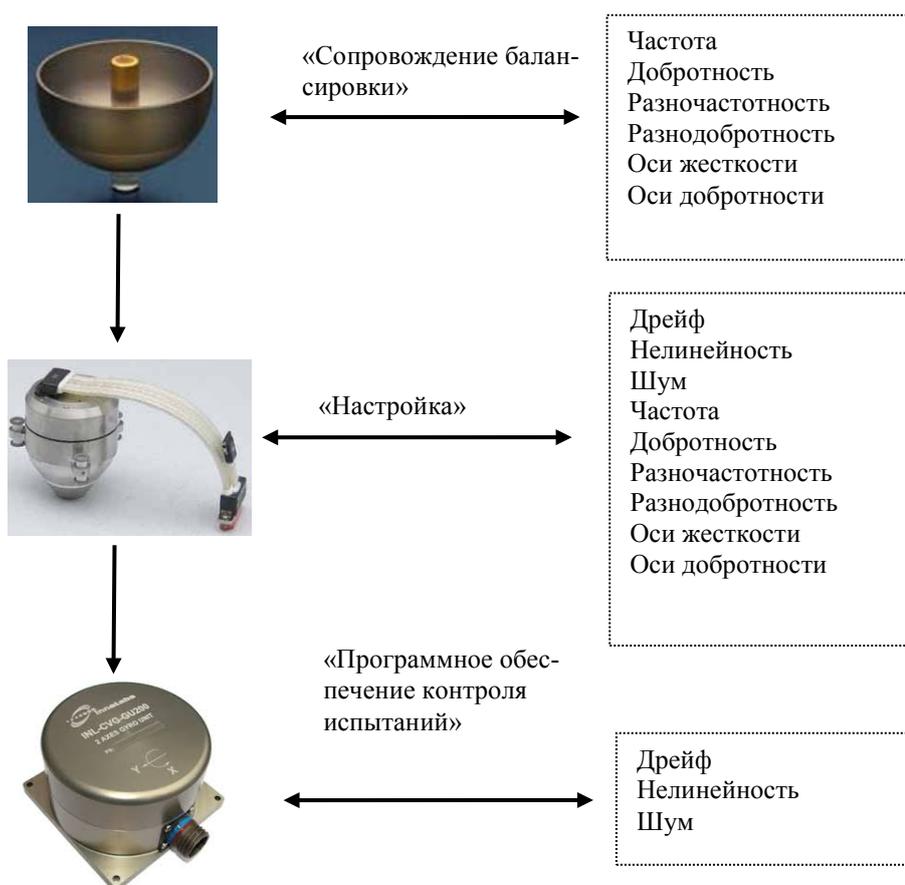


Рис. 1. Измеряемые параметры гироскопа

На практике замечено, что точностные параметры готовых изделий оказываются нетривиально зависящими от большого числа физических параметров. Причем выявляемые в научной литературе теоретические зависимости [14–19] не всегда абсолютно удовлетворяют производственному опыту из-за множества дополнительных неучтенных факторов. Так, при производстве гироскопов требуется более глубокое понимание факторов нестабильности дрейфа, нелинейности выходного сигнала, температурной нестабильности параметров, шумовой составляющей, ухудшения точности при вибра-

ях и ударах, времени наработки на отказ и других [20–22]. В результате многие факторы, влияющие на качество продукции, оказываются недостаточно понятными. Однако без их выявления крайне трудно «на ощупь» выбирать эффективные режимы технологических процессов изготовления гироскопов [23–25]. Поэтому основной целью информационно-сетевого комплекса будет являться выявление неявных нелинейных зависимостей производственных факторов на параметры точности и надежности гироскопических приборов и устройств, основанных на ТВГ.

В области автоматизации процессов производства существуют различные универсальные инструменты, повышающие эффективность изготовления соответствующей продукции [26]. Такие универсальные программные продукты распространяются на разные области производства, в том числе могут быть внедрены и в гироскопическое производство. Однако в рассматриваемом гироскопическом производстве их требуется дополнить специфическими расширениями, учитывающими особенности производственного цикла выпускаемых уникальных высокотехнологичных гироскопов. С другой стороны, применяемые за рубежом фирменные программные продукты, учитывающие специфику своих гироскопических производств [27–32] (Northrop Grumman (США), Sagem (Франция)), являются практически недоступными.

Кратко охарактеризуем некоторые известные отечественные программные продукты, которые можно попробовать адаптировать под интересующее нас решение задач производства гироскопических устройств.

Для автоматизации технологических процессов существует множество программных продуктов, используемых на производстве, таких как «SEDMAX», «Диспетчер 2.0», «ExSapReg» и другие. Большинство программ используются для решения широкого круга задач по сбору, преобразованию, хранению и отображению информации, собранной с различных устройств и систем. В основном, использование программных решений реализуют: представление данных о состояниях прибора в реальном времени, предоставление доступа к собранной информации пользователям системы в соответствии с их правами, анализ качества продукции, построение аналитических отчетов, ведение базы данных, отображение данных на экране.

Для большинства предприятий использование этих программных продуктов – необходимый и достаточный минимум для осуществления полного контроля над всем производственным циклом. Зная процесс изготовления ТВГ, сформируем и обозначим дополнительные функции, которые требуются для создания функционирующего прибора.

Устойчивый интерес имеется к программным продуктам, осуществляющим «общение» с разным оборудованием, как со станками, так и с производимыми на них приборами. Сложность заключается в одновременном мониторинге, сборе, записи, анализе данных о самом оборудовании и параметров гироскопических изделий. В настоящее время существуют программ-

ные решения, позволяющие автоматизировать часть сбора информации об оборудовании, но имеющие свои недостатки для наших целей.

Во-первых, каждый из предлагаемых продуктов напрямую не ориентирован на специфическое гироскопическое производство и поэтому не может начать работать сразу после установки программного обеспечения (при установке на компьютер, стенд, пульт и так далее). Любое оборудование использует уникальный протокол обмена, без открытия и расшифровки которого получать данные не представляется возможным. При производстве твердотельных волновых гироскопов используются разнотипные станки с ЧПУ, уникальные вакуумные установки с ионно-плазменным травлением, вакуумные установки сварки, отжига, поворотные столы, термокамеры и другое оборудование.

Во-вторых, помимо немалой стоимости программных продуктов, дополнительно потребуются значительные финансовые затраты на внедрение и адаптацию к специфике гироскопического производства.

В-третьих, описанные программные решения не отражают специфику работы гироскопического производства и требуют разработки «переходных» модулей между существующими инструментами автоматизации и покупным программным обеспечением.

Проведенный обзор различных решений показывает, что готовые решения обычно направлены на работу с производственным оборудованием. Однако при этом фактически нет программного обеспечения, которое позволяет собирать непосредственную информацию о параметрах самих изделий и выявлять факторы качества гироскопов. Существующие программные решения непосредственно не связаны со сложной структурой гироскопического производства и не учитывают специфику технологических процессов: шлифовка, полировка, химическое травление, отжиг при высоких температурах, вакуумная сварка, балансировка ионно-плазменным травлением и другие [33]. Для гироскопического производства необходимо использовать программы анализа факторов качества гироскопического производства, которые могут дополняться стандартными решениями в виде диспетчеров оборудования.

В настоящей работе рассматривается задача построения информационно-сетевого комплекса, которая производит верификацию между программными решениями автоматизации производства ТВГ на разных этапах его изготовле-

ния. Взаимодействие систем автоматизации производства и централизованное хранение данных позволяет производить обработку данных со всех этапов производства и тем самым выявлять факторы, влияющие на брак; оптимизировать технологические процессы; выявлять факторы, влияющие на потери при производстве [34]; предлагать способы устранения неблагоприятных факторов.

Поясним особенности работы предлагаемого программного продукта на примере кварцевого резонатора, являющегося чувствительным элементом ТВГ. Его изготовление и установка в гироскоп включает большое число различных операций: шлифовка, полировка, отжиг, кислотное травление, промывка, балансировка, склейка, балансировка клеенного резонатора, сварка и другие. При этом с каждого оборудования необходимо собирать физические и точностные параметры, а также измерять физические и точностные параметры изготавливаемых изделий. Только после этого можно будет перейти к обоснованному анализу и выявлению скрытых и нелинейных зависимостей. Ожидается, что разработанные решения в виде программного комплекса позволят не только снизить конечную стоимость выпускаемого изделия за счет снижения потерь при производстве, но и повысить его технические характеристики.

Разрабатываемую для этого сетевую программу будем называть Data Collection and Analysis System (DCAS). Этот программный комплекс должен обеспечивать обмен данными с другими используемыми в производстве гироскопов программами без дополнительной корректировки их исходного кода. К последним относятся программы: сопровождения балансировки ТВГ, настройки систем управления ТВГ, контроля испытаний гироскопических устройств и приборов на основе ТВГ. Кроме этого, он должен использовать эффективные алгоритмы: машинного обучения (для анализа данных и выбора путей оптимизации); шифрования (для предоставления данных пользователю в соответствии с политикой безопасности).

Общая характеристика структуры ИСК

В информационно-сетевом комплексе можно выделить две основные структуры: информационную и физическую. Информационная часть системы строится на основе программного обеспечения, использующегося при изготовлении гироскопов, настроек их систем управления, а также при проведении контроля испытаний гироскопических устройств и приборов.

В состав информационной части программного комплекса включены следующие продукты: проведения автоматического проведения контроля испытаний; измерения точностных параметров гироскопов и съема данных для настройки системы управления; балансировки резонаторов гироскопов и измерения их параметров (добротность и добротность, частоты и разночастотность) на различных технологических операциях; единая база данных, построенная на реляционной СУБД MySQL; клиентское программное обеспечение – для анализа данных об объектах взаимодействия по архитектуре «тонкий клиент»; универсальный программный модуль, предназначенный для работы с базой данных по архитектуре «толстый клиент» в составе программных продуктов, использующихся для изготовления, настройки и проверки гироскопов и приборов на их основе.

Физическую структуру информационно- сетевого комплекса можно представить в виде стандартного множества коммутирующих устройств в локальной сети производственных участков (рис. 2).

Входящие сюда устройства обмена информации можно классифицировать на узлы коммутации, устройства формирования и отправки данных (стенды, стойки и т. п.), устройства хранения информации (файловые серверы, серверы баз данных), устройства запроса и обработки информации (персональные компьютеры, вычислительные машины), периферийные устройства (принтеры, сканеры).

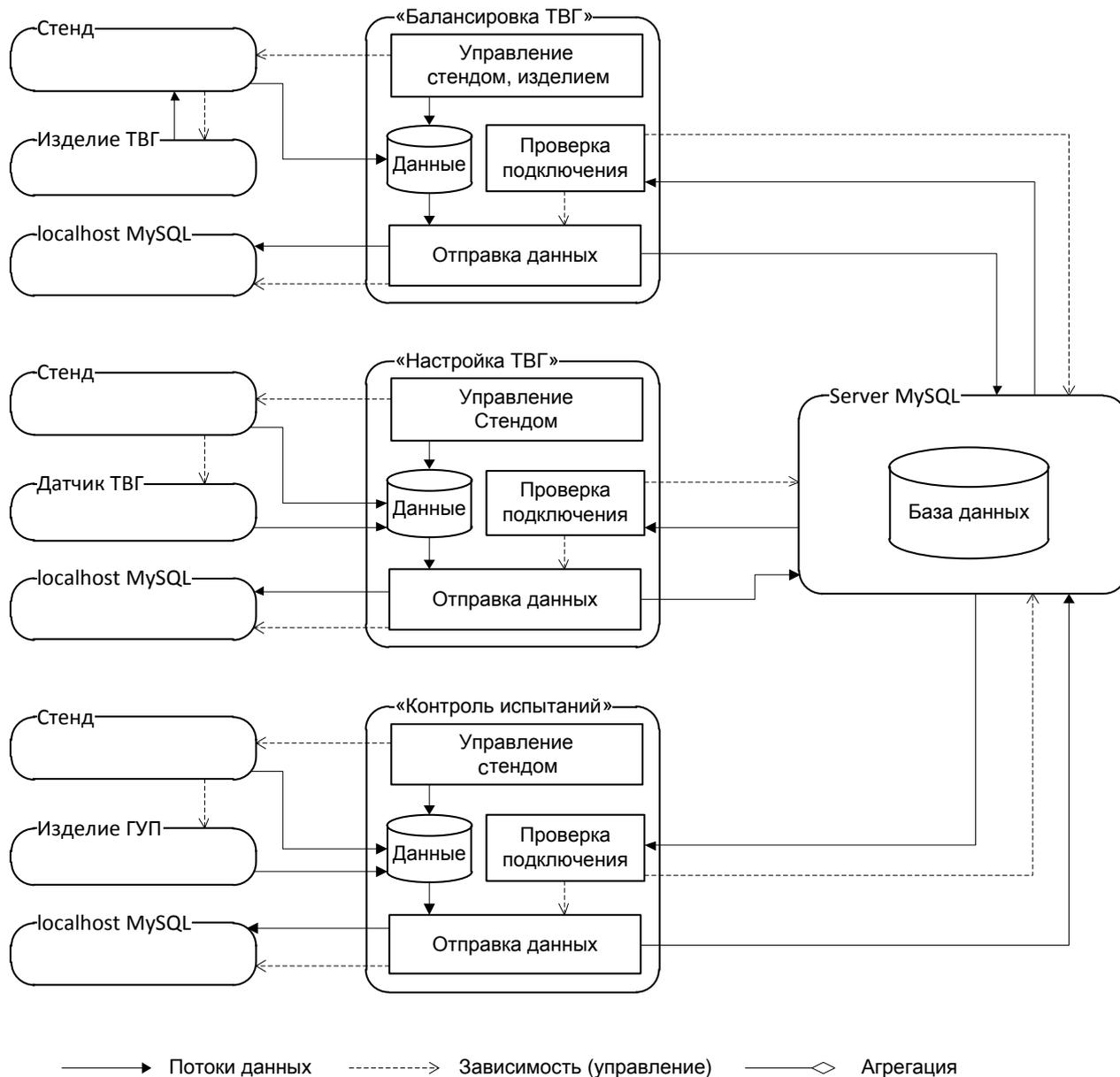


Рис. 3. Взаимодействие программных продуктов с единой базой данных

Основные формы программного продукта для анализа данных будут: «Технологические операции», «Технологические операции – Отчет», «Изделия», «Изделия – Отчет», «Пользователи», «Пользователи – Отчет», «Стенды», «Стенды – Отчет», на которых отображается

основная информация о проводимых технологических операциях на стендах, их текущем состоянии, количестве выпускаемой продукции и ушедших в брак изделиях на каждой проводимой операции.

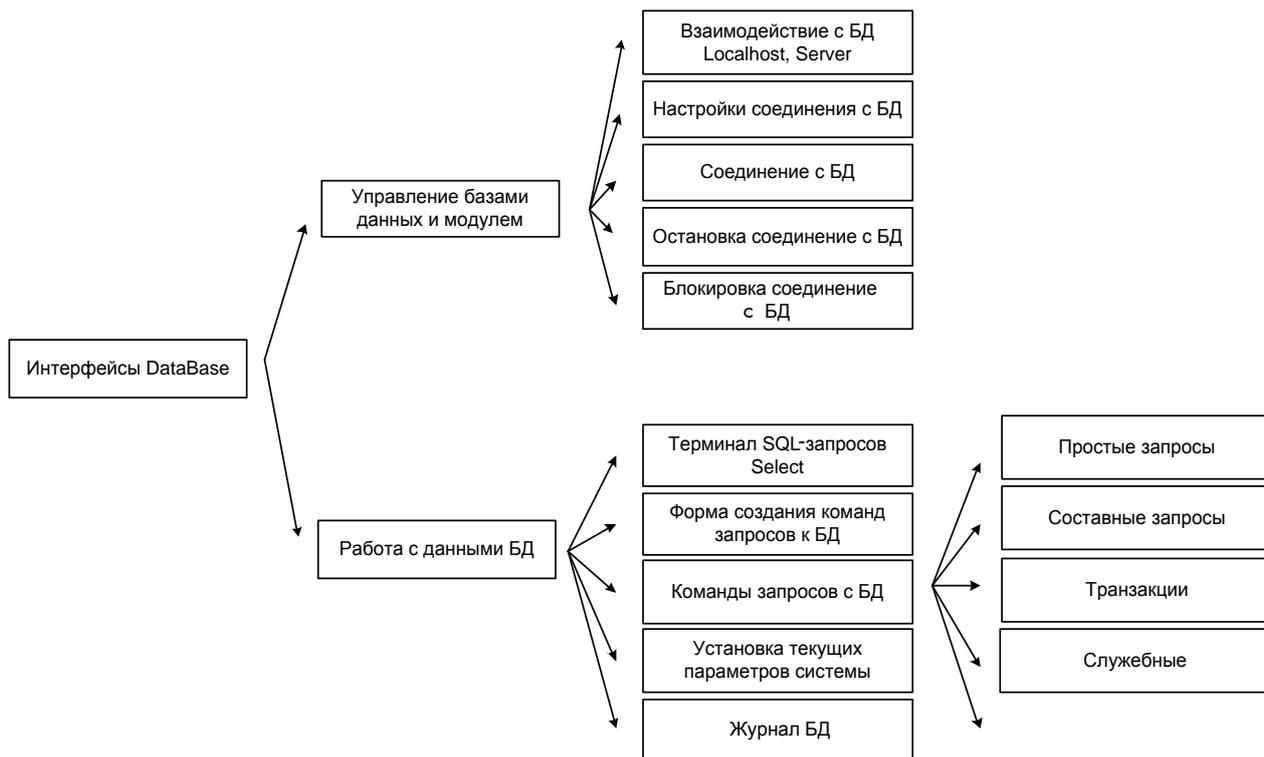


Рис. 4. Классификация внешних интерфейсов модуля

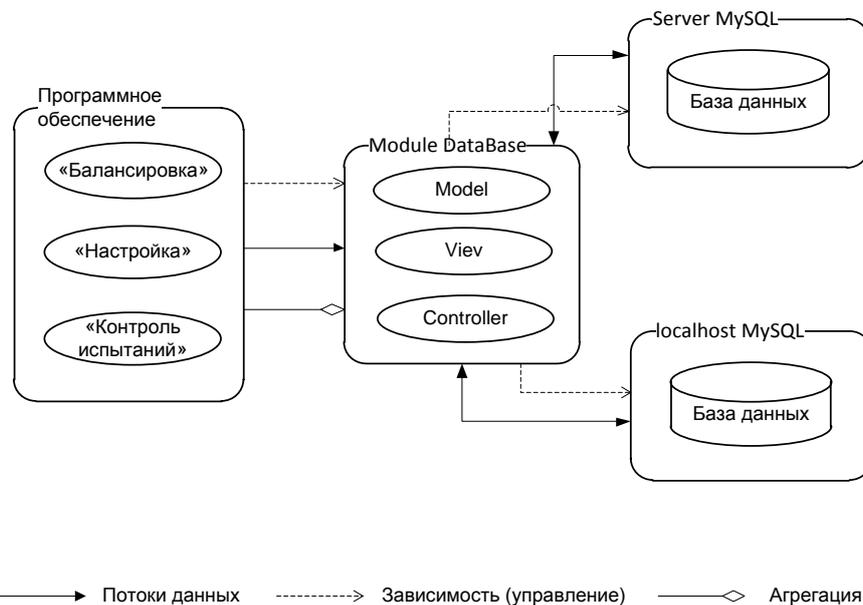


Рис. 5. Взаимодействие модуля DataBase с базами данных системы

Базы данных и основные алгоритмы в DCAS

Создание непрерывного информационного поля включает в себя совокупность терминов и правил, по которым эти термины могут быть скомбинированы для построения достоверных утверждений о состоянии рассматриваемой системы в конкретный момент времени.

Онтологическая модель производства гироскопов представляет наиболее важные утверждения в предметной области. Модель помогает описать взаимодействие различных объектов и изменение связей между ними [35, 36] в процессе разработки и изготовления гироскопов.

Подробное описание онтологической модели производства производится путем формирования непрерывного информационного поля объ-

ектами взаимодействия при изготовлении изделий. Процесс взаимодействия основных объектов при изготовлении гироскопов включает: изготавливаемые изделия; стенды, на которых производятся технологические операции; программное обеспечение для управления стендами и измерительным оборудованием; технологический процесс, описанный в документе; а также персонал (инженеры, наладчики, мастера) и т. д. Так как в результате взаимодействия объектов образуется множество сущностей с атрибутами и метаданными, поэтому хранилища данных такого типа велики.

Масштабируемость информационных систем является основным признаком приспособляемости систем к изменяемой физической структуре производства. Для решения задач такого типа требуется декомпозиция единой базы данных по следующему принципу: структурированные данные в одной базе данных; взаимосвязи объектов в другой базе данных; интеллектуальная система; документооборот; система контроля версий программного обеспечения.

При этом возникает интероперабельность общей информационной системы [37–39]. Для этих задач требуется еще одна база данных с серверным приложением, в функции которого входит верификация подсистем и общего информационного поля изготовления гироскопов.

Отдельный модуль информационно-сетевого комплекса позволяет производить запросы к базе данных и обрабатывать большие объемы информации с помощью интегрированной интеллектуальной системы, использующей алгоритмы машинного обучения.

В модуле предполагается использовать разные современные алгоритмы [40–42], включая: алгоритмы линейной и нелинейной регрессии (SVM, RandomForest, XGBoost) для выявления зависимостей количественной зависимости точностных параметров гироскопических устройств от физических параметров резонатора; деревья принятия решений для оценки влияния неколичественных факторов на итоговую точность изделий и формулирование правил оптимизации технологических процессов; нейронные сети для оптимизации режимов травления и отжига; нейронные сети для прогнозирования уровня качества при внесении изменений в технологические процессы; нейронные сети для прогнозирования времени работы до отказа; алгоритмы классификации и кластеризации для выявления изделий со скрытыми дефектами, которые с большой вероятностью проявятся после отгрузки; использование алгоритмов

снижения размерности для выявления источников снижения точности и надежности изделий.

Особенности внедрения в производство DCAS

В информационно-сетевом комплексе предусматривается безопасность проведения технологических операций на стендах за счет разграничения доступа и использования защищенных алгоритмов работы с БД. Также при разработке информационно-программного комплекса учитываются следующие аспекты: разграничение прав пользователей / операторов; доступ только под индивидуальным логином / паролем; ограничение стороннего доступа «извне» (локальная сеть); ограничение внутреннего доступа в соответствии с политикой безопасности; хранение только на определенной ЭВМ, с доступом в соответствии с политикой информационной безопасности; мониторинг активности пользователей в программе; хранение и передача данных в зашифрованном виде.

Для развертывания системы DCAS выделены следующие крупные шаги: разработка прототипа для испытательной лаборатории; формирование локального сервера (с базой данных); тестовая эксплуатация на участках экспериментальной лаборатории; интегрирование комплекса в производственный процесс для отдельного ограниченного перечня рабочих мест, настройка рабочих мест мастеров и операторов; поддержка программного обеспечения; интегрирование системы DCAS в полный производственный цикл.

Самой важной частью внедрения системы DCAS является обеспечение локальной сетью оборудования. Все оборудование на производственных участках, которое предполагается использовать в системе DCAS, должно быть физически подключено к локальной сети.

В системе DCAS предполагается использование оборудования для считывания штрих-кодов и QR-кодов, необходимых для систематизации и отслеживания производимой продукции. Данные схемы часто используются на конвейерных производствах, что позволяет производить анализ технологического процесса [43].

За счет использования централизованного хранения данных система позволит вести статистику по работе оборудования. Позволит определять неисправность оборудования, относительно проведенных отдельных операций на этом оборудовании. В том числе это позволит снизить возможность возникновения брака при обнаруженных неисправностях. Техническое обслуживание механизмов оборудования про-

водится в зависимости от времени каждой операции.

Статистика по определенным операциям, проводимым операторами оборудования, может указать на возникшие проблемы в технологическом процессе. Это позволит производить анализ операций с целью их совершенствования. Также возможно наблюдать за характеристиками изделий на полном цикле производства. В случае внезапного ухудшения характеристик оперативный анализ данных с помощью алгоритмов машинного обучения позволит понять, какая технологическая операция была проведена с возможными недочетами, или определить неисправность оборудования, которая повлекла за собой данные потери [44].

Заключение

Таким образом, разработка информационно-сетевого комплекса для сопровождения производственных операций контроля, диагностики и настройки точностных характеристик твердотельных волновых гироскопов позволит реализовать целый ряд потенциальных улучшений производства. К ним относятся оперативное и автоматическое выявление узких мест в производстве (например, возможная неисправность оборудования, необученность персонала), а также оптимизация параметров технологических процессов, в том числе оптимизация времени травления ионного источника, которое нелинейно зависит от множества параметров (мощности источника, уровня вакуума, количества предыдущих итераций травления резонатора, количества итераций травления при данной технологической операции, температуры резонатора и других).

Библиографические ссылки

1. Лунин Б. С., Матвеев В. А., Басараб М. А. Волновой твердотельный гироскоп. Теория и технология : монография. М. : Радиотехника, 2014. 176.
2. Beitia J. Low Cost CVG for High-Grade North Finders and Targeting Systems 2014. DOI:10.1109 / InertialSensors.2014.7049408 https://www.researchgate.net/publication/308731387_Low_cost_CVG_for_high-grade_north_finders_and_targeting_systems.
3. Шишаков К. В. Твердотельные волновые гироскопы: волновые процессы, управление, системная интеграция. Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2018. 264 с.
4. Chikovani V. V. Self-Compensation for Disturbances in Differential Vibratory Gyroscope for Space Navigation Hindawi, 2019 DOI: 10.1155/2019/5234061.
5. Авдеева В. М., Крючкова И. Н. Обработка статистических данных и определение состава входов нейросети в процессе формирования
- информационной базы для прогнозирования // Территория науки. 2007. № 2. С. 196–2004.
6. Баумаков А. И., Баумаков И. А. Интеллектуальные информационные технологии. М. : Изд-во МГТУ им Н. Э. Баумана, 2005. 304 с.
7. Andrey Ostroukh, Aleksander Kolbashin, Natalia Surkova, Dmitry Fatukhin *Automated process control system of concrete twin-layer paver and block production* // APRN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. 5208 - 5211. ISSN 1819 - 6609.
8. Басараб М. А., Матвеев В. А. Аппроксимация распределения плотности резонатора волнового твердотельного гироскопа по измеренным параметрам дебаланса // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2015. № 10.
9. Маслов А. А., Маслов Д. А., Меркурьев И. В. Идентификация параметров волнового твердотельного гироскопа с учетом нелинейности колебаний резонатора // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2014. № 5.
10. Маслов Д. А. Идентификация параметров волнового твердотельного гироскопа при медленно меняющейся частоте вынужденных колебаний // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. Т. 70. № 10.
11. Мингазов Р. И., Спиридонов Ф. И., Шишаков К. В. Методики исследования свободного выбега стоячих волн в твердотельном волновом гироскопе // Интеллектуальные системы в производстве. 2020. Т. 18, № 3. С. 20–32.
12. Новое поколение ИНС на основе ВТГ / С. Негри, Э. Лабарр, К. Линьон, Э. Брунштейн, Э. Салаён // Гироскопия и навигация. 2016. Т. 24, № 1 (92). С. 49–59. DOI: {10.17285/0869-7035.2016.24.1.049-059} elibrary.ru/item.asp?id=2577458.
13. Qiu B., Li P., Wang J. Full digital control of hemispherical resonator gyro under force-to-rebalance mode // IEEE Sensors Journal. Т. 15. №1. 2015. P. 71-75. DOI: {10.1109/JSEN.2014.2339229} elibrary.ru/item.asp?id=24635569.
14. Журавлев В. Ф., Жбанов Ю. К. Влияние подвижного центра резонатора на работу волнового твердотельного гироскопа // МТТ. 2007. № 6.
15. Журавлев В. Ф. ВТГ: современное состояние, некоторые аспекты // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем: процессы, модели, эксперимент. 2011. № 2 (33). С. 118–123. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26104278>.
16. Каленова Н. В. Влияние угловых перемещений резонатора волнового твердотельного гироскопа на взаимосвязь рабочих колебаний с балочными // МТТ. 2009. № 5.
17. Климов Д. М. Журавлев В. Ф., Жбанов Ю. К. Кварцевый полусферический резонатор (Волновой твердотельный гироскоп). М. : ФГБУН ИПМех им. А. Ю. Ишлинского РАН, 2017. 193 с.
18. Кривов А. В., Абрамов И. В. Современное состояние проблемы балансировки резонаторов твердотельного волнового гироскопа // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса

в XXI веке : сборник материалов IV Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием / отв. за выпуск: А. П. Тюрин, В. В. Сяктерева. Ижевск, 20-21 апреля 2016. Ижевск: ИННОВА, 2016. С. 195–200.

19. Трутнев Г. А. Модель ТВГ в медленных переменных // Вестник Удмуртского университета. Математика. Компьютерные науки. 2015. Т. 25, № 3. С. 421–429.

20. Трутнев Г. А. Модель конструкционного демпфирования твердотельного волнового гироскопа // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2019. Т. 29, № 1. С. 84–91. URL: <https://doi.org/10.20537/vm190108>.

21. Трутнев Г. А., Назаров С. Б., Перевозчиков К. К. Система съема и способы измерения колебаний резонатора твердотельного волнового гироскопа // Вестник МГТУ. Сер. Приборостроение. 2020. № 1 (130). С. 20–63. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42718328>.

22. Измерительно-вычислительный комплекс ТВГ / Г. А. Трутнев, С. Б. Назаров, К. К. Перевозчиков, А. В. Щенятский // Интеллектуальные системы в производстве. 2017. Т. 15, № 3. С. 62–72. DOI: 10.22213/2410-9304-2017-3-62-72.

23. Калабин А. Л., Керницкий А. В., Пакивер Э. А. Программная система предпроектных исследований технологических процессов формирования химических волокон // Программные продукты и системы. 2008. № 1. С. 16–19.

24. Кузичкин А. А., Губанов Г. Б. Разработка комплекса программ для математического моделирования и оптимизации процесса каталитического рифоринга // Вестник технологического университета. 2017. № 22. С. 77–83.

25. Сачко Н. С. Организация и оперативное управление машиностроительным производством : учебник. Мн. : Новое знание, 2005. 636 с. : ил. (Техническое образование). ISBN 985-475-118-X.

26. Нийонсаба Т., Павлов В. А. Программно-алгоритмическое обеспечение автоматизированной системы управления технологическими процессами с заданными параметрами продукта // Программные продукты и системы. 2018. Т. 31, № 1. С. 140–144. DOI: 10.15827/0236-235X.031.1.140-144.

27. Fabrice Delhayе. HRG by Safran - The game-changing technology DOI:10.1109/ISISS.2018.8358163 https://www.researchgate.net/publication/324951579_HRG_by_Safran_-_The_game-changing_technology.

28. HRG by Sagem from laboratory to mass production DOI:10.1109/ISISS.2016.7435530 https://www.researchgate.net/publication/301710868_HRG_by_Sagem_from_laboratory_to_mass_production.

29. Naser El-Sheimy. Inertial sensors technologies for navigation applications: state of the art and future trends // Satellite Navigation 1. 2020. DOI:10.1186/s43020-019-0001-5.

30. Remillieux G., Delhayе F. Sagem Coriolis Vibrating Gyros: A vision realized // DOI:10.1109/Inertial-Sensors.2014.7049409

https://www.researchgate.net/publication/283814118_Sagem_Coriolis_Vibrating_Gyros_A_vision_realized.

31. Reza Sedaghati. Hemispherical Vibratory Gyroscope Performance Evaluation and Sensitivity Analysis with Capacitive Excitation // J. Elec. Comput. Eng. Innov. 2019, vol. 7, no. 1, pp. 45-56, DOI: 10.22061/JECEI.2019.5565.239.

32. The Hemispherical Resonator Gyro: From Wineglass to the Planets / David Rozelle // Advances in the Astronautical Sciences. 2009. No. 134. Pp. 1157-1178. https://www.researchgate.net/publication/279909300_The_Hemispherical_Resonator_Gyro_From_Wineglass_to_the_Planets.

33. Матвеев В. А., Лунатников В. И., Алехин А. В. Проектирование волнового твердотельного гироскопа : учеб. пособие для вузов. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. 168 с.

34. Шацких Е. А. Факторы, влияющие на качество продукции в промышленном производстве // Альманах современной науки и образования. Тамбов: Грамота, 2014. № 12. С. 140–142. URL: <http://www.gramota.net/materials/1/2014/12/41.html>

35. Вагин В. Н., Михайлов И. С. Разработка метода интеграции информационных систем на основе метамоделирования и онтологии предметной области // Программные продукты и системы. 2008. № 1. С. 22–26.

36. Тихомиров В. А., Карпов И. А., Тихомирова Е. В. Системный подход к интеграции информационных ресурсов в концепции математического моделирования // Программные продукты и системы. 2008. № 1. С. 4–7.

37. Бальшиова А. А., Каменщиков А. А., Олейников А. Я. Обеспечение интероперабельности как средства бесшовной интеграции функциональных подсистем в составе автоматизированных систем военного назначения // Журнал радиоэлектроники. 2018. № 9. С. 18.

38. Басараб М. А., Ивойлов М. А., Матвеев В. А. Оптимизация балансировки волнового твердотельного гироскопа с помощью нейронной сети Хопфилда // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. С. 289–298.

39. Волобуева Е. О., Качалов Д. Л., Щербаков М. В. Мобильные компоненты и технологии больших данных для мониторинга электропотребления // Известия волгоградского государственного технического университета. 2015. № 6 (163). С. 54–57.

40. Батоврин В. К., Гуляев Ю. В., Олейников А. Я. Обеспечение интероперабельности – основная тенденция в развитии открытых систем // Информационные технологии и вычислительные системы. 2009. № 5. С. 7–15.

41. Nashwa El-Bendary, Esraa El Hariri, Aboul Ella Hassanien, Amr Bard *Using machine learning techniques for evaluating tomato ripeness* // Expert Systems with Applications Volume 42, Issue 4, 2015, P.1892-1905 {DOI:10.1016/j.eswa.2014.09.057}

42. Fergus P., Hussain A., David Hignett, Al-Jumeily D., Khaled Abdel-Aziz, Hani Hamdan. A machine learning system for automated whole-brain seizure detec-

tion // Applied Computing and Informatics. Vol. 12. Issue 1. 2016. Pp. 70-89. DOI: 10.1016/j.aci.2015.01.001.

43. Syreyshikova N.V., Semashko L.A. Gauges Manufacture Process Planning Automated Control System at an Industrial Enterprise. // Procedia Engineering. 2017. P. 965-971. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.579.

44. Nagdev Amruthnath, Tarun Gupta. A research study on unsupervised machine learning algorithms for early fault detection in predictive maintenance // 2018 5th International Conference on Industrial Engineering and Applications. 2018. P. 355-361. DOI: 10.1109/IEA.2018.8387124.

References

1. Lunin B.S., Matveev V.A., Basarab M.A. *Volnovoj tverdotel'nyj giroskop. Teorija i tehnologii* [Hemispherical resonator gyro. Theory and technology]. Moscow: Radiotekhnika publ., 2014 (in Russ.).

2. Beitia J. Low Cost CVG for High-Grade North Finders and Targeting Systems 2014. DOI:10.1109 / InertialSensors.2014.7049408

https://www.researchgate.net/publication/308731387_Low_cost_CVG_for_high-grade_north_finders_and_targeting_systems

3. Shishakov K.V. *Tverdotel'nye volnovye giroskopy: volnovye protsessy, upravlenie, sistemnaya integratsiya* [Solid wave gyroscopes: wave processes, control, system integration]. Izhevsk: Izd-vo IzhGTU. 2018. 264 p.

4. Chikovani. V.V. Self-Compensation for Disturbances in Differential Vibratory Gyroscope for Space Navigation Hindawi, 2019 DOI:10.1155/2019/5234061

5. Avdeeva V.M., Krjuchkova I.N. [Processing statistical data and determining the composition of the neural network inputs in the process of forming an information base for forecasting]. *Territorija nauki*. 2004. No. 2, pp. 196-204 (in Russ.).

6. Bashmakov A.I., Bashmakov I.A. *Intellektual'nye Informacionnye Tehnologii* [Intelligent information technology]. Moscow: Publishing house of MSTU im. N.E. Bauman. 2005 (in Russ.).

7. Andrey Ostroukh, Aleksander Kolbashin, Natalia Surkova, Dmitry Fatukhin *Automated process control system of concrete twin-layer paver and block production* // APRN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. 5208 - 5211. ISSN 1819 - 6609.

8. Basarab M.A., Matveev V.A. [Approximation of the density distribution of the resonator of a solid-state wave gyroscope by the measured unbalance parameters]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*. 2015. No. 10, pp. 9-16 (in Russ.).

9. Maslov A. A., Maslov D. A., Merkurev I. V. [Identification of parameters of a wave solid-state gyroscope taking into account the nonlinearity of resonator oscillations]. *Pribory I sistemy. Upravlenie, control, diagnostika*. 2014. No. 5, pp. 18-23 (in Russ.).

10. Maslov D.A. [Identification of parameters of a wave solid-state gyroscope at a slowly varying frequency of forced vibrations]. *Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie*. 2017. No. 1, pp. 24-31 (in Russ.).

11. Mingazov R.I., Spiridonov F.I., Shishakov K.V. [Methods of researching the free run of standing waves in solid wave gyroscope. Intelligent Systems in Manufacturing]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2020. Vol. 18, no. 3, pp. 20-32 (in Russ.).

12. Negri S., Labarr Je., Lin'on K., Brunshtejn Je., Salajon Je. [A new generation of INS based on HTG]. *Giroskopija i navigacija*. 2016. Vol. 24, no. 1, pp. 49-59 (in Russ.).

13. Qiu B., Li P., Wang J. Full digital control of hemispherical resonator gyro under force-to-rebalance mode. In IEEE Sensors Journal. T. 15. No. 1. 2015. Pp. 71-75. DOI: {10.1109/JSEN.2014.2339229} elibrary.ru/item.asp?id=24635569.

14. Juravlev V.F., Jbanov Y.K. [Influence of the moving center of the resonator on the operation of a wave solid-state gyroscope]. *Mekhanika tverdogo tela*. 2007. No. 6, pp. 14-24 (in Russ.).

15. Zhuravlev V.F. [VTG: current state, some aspects]. *Aktual'nye problemy aviacionnyh i ajerokosmicheskikh sistem: processy, modeli, jeksperiment*. 2011. Vol. 33, no. 2, pp. 118-123 (in Russ.).

16. Kalenova N.V. (2009). *Mekhanika tverdogo tela* [Mechanics of Solids], no. 5, pp. 36-41 (in Russ.).

17. Klimov D.M., Juravlev V.F., Jbanov Y.K. *Kvartsevyyi polusfericheskiy resonator (Volnovoi tverdotel'nyi giroskop)* [Quartz hemispherical resonator (Hemispherical resonator gyroscope)]. Moscow: FGBUN IPMeh im. A. Y. Ishlinskogo, 2017. (in Russ.).

18. Krivov A.V., Abramov I.V. *Sovremennoe sostoyanie problem balansirovki rezonatorov tverdotelnogo volnovogo giroskopa* [Current state of the problem of balancing resonators of a hemispherical resonator gyroscope]. Proceedings of the *Molodye uchenye - uskoreniy nauchno-technicheskogo progressa v XXI veke*, 2016. pp. 195-200 (in Russ.).

19. Trutnev G.A. [TVG model in slow variables]. *Vestnik Udmurtskogo Universiteta. Matematika. Mekhanika. Komp'yuternye Nauki*. 2015. Vol. 25, no. 3, pp. 421-429 (in Russ.).

20. Trutnev G.A. [Model of structural damping of a solid-state wave gyroscope]. *Vestnik Udmurtskogo Universiteta. Matematika. Mekhanika. Komp'yuternye Nauki*. 2019. Vol. 29, no. 1, pp. 84-91 (in Russ.).

21. Trutnev G.A., Nazarov S.B., Perevozchikov K.K. [Removal system and methods for measuring resonator oscillations of a solid-state wave gyroscope]. *Vestnik moskovskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta im. N.Ie. Baumana. Seriya priborostroenie*. 2020. No. 1, pp. 20-63 (in Russ.).

22. Trutnev G.A., Nazarov S.B., Perevozchikov K.K., Shhenjatskij A.V. [TVK measuring and computing complex]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2017. Vol. 15, no. 3, pp. 62-72 (in Russ.).

23. Kalabin A.L., Kernickij A.V., Pakshver Je.A. [Software system for pre-project studies of technological processes of chemical fiber formation]. *Programmnye produkty i sistemy*. 2008. No. 1, pp. 16-19 (in Russ.).

24. Kyzichkin A.A. Gubanov G.B. [Development of a software package for mathematical modeling and optimization of the catalytic reforming process]. *Vestnik*

tehnologicheskogo universiteta. 2017. Vol. 20, no. 22, pp. 77-83 (in Russ.).

25. Sachko N.S. (2005). *Organizacija i operativnoe planirovanie mashinostroitel'nogo proizvodstva* [Organization and operational planning of engineering production]. Minsk: Novoe znanie (in Russ.).

26. Nijonsaba T., Pavlov V.A. [Development of a software package for mathematical modeling and optimization of the process of catalytic reforming program and algorithmic support of an automated process control system with specified product parameters]. *Programmnye produkty i sistemy*. 2018. Vol. 31, no. 1, pp. 140-144 (in Russ.).

27. Fabrice Delhaye. HRG by Safran - The game-changing technology DOI:10.1109/ISISS.2018.8358163 https://www.researchgate.net/publication/324951579_HRG_by_Safran_-_The_game-changing_technology

28. HRG by Sagem from laboratory to mass production DOI:10.1109/ISISS.2016.7435530 https://www.researchgate.net/publication/301710868_HRG_by_Sagem_from_laboratory_to_mass_production

29. Naser El-Sheimy. Inertial sensors technologies for navigation applications: state of the art and future trends // *Satellite Navigation* 1. 2020. DOI:10.1186/s43020-019-0001-5

30. Remillieux G., Delhaye F. Sagem Coriolis Vibrating Gyros: A vision realized // DOI:10.1109/InertialSensors.2014.7049409

https://www.researchgate.net/publication/283814118_Sagem_Coriolis_Vibrating_Gyros_A_vision_realized

31. Reza Sedaghati. Hemispherical Vibratory Gyroscope Performance Evaluation and Sensitivity Analysis with Capacitive Excitation // *J. Elec. Comput. Eng. Innov.* 2019, Vol. 7, No. 1, pp. 45-56, DOI: 10.22061/JECEI.2019.5565.239

32. The Hemispherical Resonator Gyro: From Wineglass to the Planets / David Rozelle // *Advances in the Astronautical Sciences*. – 2009. – № 134. – P. 1157-1178. https://www.researchgate.net/publication/279909300_The_Hemispherical_Resonator_Gyro_From_Wineglass_to_the_Planets

33. Matveev V. A., Lipatnikov V. I., Alehin A. V. *Proektirovanie volnovogo tverdotelnogo giroskopa* [Designing of hemispherical resonator gyroscope]. Moscow: MGTU im. N. E. Bauman, 1997 (in Russ.).

34. Shackih E.A. [Factors affecting product quality in industrial production]. *Al'manah sovremennoj nauki i obrazovanija*. 2014. No. 12, pp. 140-142 (in Russ.).

35. Vagin V.N., Mihajlov I.S. (2008). *Programmnye produkty i sistemy* [Software & systems], no. 1, pp. 22-26 (in Russ.).

36. Tihomirov V.A., Karpov I.A. Tihomirova E.V. [Development of a method for integrating information systems based on metamodeling and domain ontology]. *Programmnye produkty i sistemy*. 2008. No. 1, pp. 4-7 (in Russ.).

37. Balyshova A.A., Kamenshnikov A.A., Olejnikov A.Ja [Ensuring interoperability as a means of seamless integration of functional subsystems as part of automated military systems]. *Zhurnal radioelektroniki*. 2018. No. 9, pp. 18 (in Russ.).

38. Basarab M.A., Ivojllov M.A., Matveev V.A. [Optimizing the balancing of the wave solid-state gyroscope using the Hopfield neural network]. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im.N.Je. Bauman*. 2012. No. 7, pp. 289-298 (in Russ.).

39. Volobueva E.O., Kachalov D.L., Shherbakov M.V. [Mobile components and big data technologies for power consumption monitoring]. *Izvestija volgo-gradskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*. 2015. Vol. 163, no. 6, pp. 54-57 (in Russ.).

40. Batovrin V. K., Guljaev Ju. V., Olejnikov A. Ja. [Ensuring interoperability is the main trend in the development of open systems]. *Informacionnye tehnologii i vychislitel'nye sistemy*. 2009. No. 5, pp. 7 (in Russ.).

41. Nashwa El-Bendary, Esraa El Hariri, Aboul Ella Hassaniien, Amr Bard *Using machine learning techniques for evaluating tomato ripeness*. *Expert Systems with Applications*. Vol. 42, Issue 4, 2015, Pp. 1892-1905. DOI:10.1016/j.eswa.2014.09.057.

42. P. Fergus, A. Hussain, David Hignett, D. Al-Jumeily, Khaled Abdel-Aziz, Hani Hamdan *A machine learning system for automated whole-brain seizure detection*. *Applied Computing and Informatics*. Vol. 12, Issue 1, 2016. Pp. 70-89. DOI: 10.1016/j.aci.2015.01.001.

43. Syreyshikova N.V., Semashko L.A. *Gauges Manufacture Process Planning Automated Control System at an Industrial Enterprise*. *Procedia Engineering*. 2017. Pp. 965-971. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.579.

44. Nagdev Amruthnath, Tarun Gupta *A research study on unsupervised machine learning algorithms for early fault detection in predictive maintenance*. 2018 5th International Conference on Industrial Engineering and Applications. 2018. P. 355-361. DOI: 10.1109/IEA.2018.8387124.

Development of an Information-Network Complex to Support Production Operations of Control, Diagnostics and Adjustment of the Accuracy Characteristics of Solid-State Wave Gyroscopes

R. I. Mingazov, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

R. V. Melnikov, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

F. I. Spiridonov, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

K. V. Shishakov, DSc in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

The paper is devoted to the development of the Information and Network Complex (ISC) to support the production operations of monitoring, diagnostic and customizing the exact characteristics of solid wave gyroscopes in order to improve the quality of products and the efficiency of processes.

To do this, the analysis of existing information systems to support the automation of processes and their control is first carried out. The possibility of using such systems in the production of solid-state wave gyroscopes is discussed.

As a result, the structure of the ISC is proposed, which is divided into physical and information subsystems. It provides a physical subsystem of switching devices in the form of stands with industrial computers, communication hubs, servers and personal computers and other peripherals. And the information subsystem includes software to automate technological operations and analyze the data received. It is assumed that the data analysis software will also make requests to the database and process large amounts of information using machine learning algorithms.

To improve the efficiency of the entire system, automatic collection of physical and accurate parameters of products at different stages of their production is organized. Among the main planned results of the work of the ISC the following issues are highlighted: optimization of processes and identification of complex multi-factor non-linear dependences of quality parameters from the parameters of technological operations, as well as automatic operational identification of faulty equipment with recommendations for its repair and automatic operational monitoring of the level of skills of operators with regulators.

Separately, the ways of integrating ISC into the production process of making solid wave gyroscopes are discussed.

Keywords: solid state wave gyroscope, machine learning, software, industrial automation, manufacturing processes.

Получено: 08.12.2020